有機質肥料合理化施用與環境維護

陳琦玲、張瑞明

行政院農業委員會農業試驗所農業化學系

一、摘要

人類是地球生態系之一員，並且賴此生態系維持生存。人類農業活動亦可能為環境帶來衝擊，對此生態系造成破壞。面對目前全球嚴重的三大問題，人口急增、資源短缺和環境污染問題，施用肥料以提高農業生產，應付急增的人口問題，是必要的手段。然而大量施肥所造成的非點源污染，在繼工業廢污後受到更多關注。無論就化學肥料或有機肥料過量或不當的施用，除了影響生產品質，亦可能對環境造成衝擊，如地下水質劣化、水體的優養化、溫室氣體的釋放等問題，不僅降低環境品質，並可能導致全球溫暖化、氣候變遷等問題，足見合理化施肥之重要性。台灣農民普遍有過量施肥之習慣，為維持生態平衡與環境品質，可藉土壤與葉片營養診斷、參考施肥手冊等方法，評估合理的施肥量或調整施肥的方式，一方面降低成本、節省資源，一方面使農業生產與環境保護可以兼顧。為防範禽畜糞堆肥所含重金屬污染農田，應注意總施用量，不能超過土壤所能承載之最大量。本文亦檢討長期施用有機質肥料對土壤地力增進之效果，及應注意事項。

二、前言

在生命世界中的組成，究其根本，由物質和能量所構成，能量在宇宙中是不滅的，構成生命世界所需要的物質在地球裡也是不滅的，全取材於地球，只在生物及非生物世界中流轉。如氮元素是蛋白質的組成之

一，因此氮的物質循環在自然界相當重要。大氣中含有 78%的氮，但這種形式的氮只能爲生物圈中少數的固氮微生物利用，土壤中的含氮礦物才是大部分生物體中氮的來源。植物體以養分的形式吸收這些含氮物質，這樣氮元素才真正進入食物網，然後它在生物體間流轉。動物體的排泄物及動、植物的遺體經微生物分解的結果，使氮元素重返大自然。

我國祖先很早即懂得種植作物，除發展犁田、中耕、除草等方法，更懂得將動物排泄廢棄物、植物之殘體，回歸於農地，使之不至因耕作而消耗，如此耕作制度合乎自然生態體系與物質循環，符合目前永續農業發展之精神。但自化學肥料研發問世後，由於其肥效之快速及增進作物產量之效果顯著，又因農村勞力不足，化學肥料遂逐漸取代有機肥料，有機質肥料甚而完全被遺棄而不用。近年來由於環保意識的抬頭，及考慮減緩非再生資源消耗速度，致使有機質肥料的使用再度受到重視。此外，台灣目前每年有一千二百餘萬噸的農業廢棄物，若隨便排放，將對環境造成很大的衝擊。廢棄物直接農用或經堆肥化製成堆肥後再施於農地，爲處置農業廢棄物，又增加土壤生產力的常見方法，唯過量或不正確的施用，仍會對土壤、環境、人畜健康及作物生長造成傷害。

三、過量或不當的施肥對環境的衝擊

自從 1972 年 6 月聯合國在斯德哥爾摩舉行"人類環境會議(UN Conference on Human Environment)"提出"只有一個地球"主題後，加強了全球人類對目前面臨問題的警覺與共識，當前最嚴重的問題是人口爆炸，資源短缺和環境污染。因應人類糧食需求施用肥料追求農業增產是必要的手段。然而在環境保護上肥料是農業的非點污染已繼工業廢污之後受到更多的關注(王等，1994b；劉與徐，1994)。

植物質的有機質肥料出於農田又歸於農田，較不會對環境造成衝擊，動物質肥料或堆肥則因餵料或加工之添加物，可能在農田累積，而對作物、人畜造成傷害。家庭或工業廢棄物製成之堆肥則可能因含植物不能利用之物質，甚至是毒物質，而對環境、作物、人畜造成傷害，使用前應確實得知製造過程是否將雜質濾出。豆粕與禽畜糞尿在農田的分

解快速，即使是堆置過的堆肥，雖然其養份的釋出，需藉著微生物的分解，其大量要素對環境的衝擊應較化學肥料緩和，但過量的施用，超過農田所能涵容時，過多的氮肥隨雨水或灌溉水而進入地下水，造成飲用水質變劣，或經脫氮作用形成溫室氣體釋入大氣中，導致溫室效應與氣候變遷；過多的營養素流入環境中，亦會造成水體的優養化，這些後果對於我們的未來及後代子孫的生存都相當的不利。除了環境問題，還有資源存量問題。根據調查，以目前使用量，全球磷、鉀礦蘊藏量，僅可維持未來三、五百餘年，即將耗盡。

(1)肥分之流失

硝態氮(NO_3-N)通過土壤進入地下水系統，影響飲用水水質之發現已有半世紀的歷史(Campell et al., 1954)。飲用水中硝酸根導致藍嬰症(blue baby syndrome，學名 methemoglobinemia)之濃度在人類尤低於家畜(45mg/l vs. 200mg/l)(Lal and Stewart. 1994)，硝酸根與胺(amine)或醯胺(amide)結合而成亞硝胺(nitrosamine)及亞硝醯胺(nitrosamide)類化合物，其中 80%經證明有致癌性(OECD, 1986)。地下水之氮素污染源主要來自放牧動物排泄物或氮素肥料的使用管理不當。依據林等(1999)屏東地區地下水之分析結果，發現部分地區之無機態氮與銨態氮濃度，已超過飲用水標準，是畜牧業或施肥引起，值得探究。

另一個值得注意的是磷的淋失，根據郭等(1999)在北部水田、中部水旱田及南部蓮霧和檳榔園等監測點的調查分析，發現在中部彰化的水旱田有明顯的磷淋失現象(表3)。在一般的耕作下，磷在土壤中易被固定，故在下層土壤的含磷量都低。但在粗質地淋洗量充足的地方，仍會往下層土壤淋洗，故在粗質地耕作仍需留意營養源的流失，而減少施肥量或調整肥料施用的方式。

除了肥分往下淋洗，恐污染地下水外，隨著降雨或灌溉，亦有可能隨著逕流入水體而造成優養化。常見者為水源水庫滋生藻類，渠道埤池滿佈布袋蓮、雜草，影響環境衛生。水質優養化，水中微生物大量繁殖，溶氧量耗盡，魚類無法生存，此外銨態氮及有機磷對魚類有劇毒，能使魚類大量死亡。引用受氮磷污染之灌溉水就如同施過量之肥料，常造成水稻插秧期受鹽害死亡，生長初期分蘗特多，但為無效分蘗，抽穗期後

多有倒伏，成熟期腐爛枯死，溼熱季節誘發稻熱病等現象。日本亦有報告指出每公頃施用 100 公噸豬糞堆肥，即造成硝酸態氮污染地下水，且有機物含有相當量的磷，可隨表面逕流污染河川水源。台灣高溫多雨，有機質肥料的分解快速，預期施用量低於 100 公噸，即會對環境造成衝擊。

爲防止施用之有機質肥料隨逕流流失，應避免將有機質肥料施用在陡坡地的土壤表面。並且最好能將其直接注入土層中或藉耕作方式將其混入土壤中，以減輕表面逕流的流失。此外，做好水土保持工作，如利用覆蓋或敷蓋植物之方式，亦可減輕表面逕流及淋洗現象。荷蘭農業從業人員，甚至在田區的四邊都不施肥，以防肥分隨逕流入其他水體，其對環境之關注，值得敬重與效法。

2)溫室氣體的排放

在常態(即自然演變)下，主要由於火山的活動及全球生態系統的運轉，全球的氣候以百萬年爲時間單位，緩慢而漸進式的改變。但是，由於人類的活動，主要係石化能源的長期(尤其自 19 世紀工業革命以來)大量的使用及人造化學品的產製，增加了大氣中的溫室效應氣體(如二氧化碳、甲烷、氧化亞氮、氟氯碳化物等)的濃度，增強了溫室效應(greenhouse effect)，導致地球表面溫暖化，並加速氣候的變遷。

農業部門釋出之溫室氣體雖不及能源部門釋出之大量，但主要是甲烷與氧化亞氮，而甲烷吸收輻射的能力是二氧化碳之 30 倍，而氧化亞氮吸收輻射之能力則爲二氧化碳之 150 倍左右(Kimura et al., 1991；Wang et al., 1976)，甲烷與氧化亞氮在大氣中之含量雖遠小於二氧化碳，但其對地球增溫所產生之影響卻隨人類文明之進步而大幅增加(Bartlett and Harriss, 1993)。而農業生態系提供 N_2O 釋放量約佔生物圈釋放量之 70%至 80%(Mosier et al., 1996)，

土壤中，80%之甲烷是在還原環境下，由一群極端厭氣之甲烷菌(Methanogens)分解有機物所產生(Ehhalt and Schmidt, 1978)，因此常發生於濕地與浸水水田土壤中，畜產業亦釋出一部分甲烷。甲烷爲可利用能源，許多國家已研究並利用之。

土壤 N_2O 之釋放，主因氮肥之施用，生物共生與非共生固氮作用，

及土壤有機氮素礦化作用所致(Cole 等，1995)。據目前所獲資料，全球每年因施用氮肥而排放 N_2O 量約爲 3.01 百萬噸，約佔人爲排放爲 N_2O 量之 70%。目前全世界化學氮肥使用到農地每年約爲 77.4 百萬噸，廄肥氮用作爲氮肥之量約含 74.9 百萬噸。全球農地因施用化學氮肥而排放之 N_2O-N，每年約爲 1.53 百萬噸，因施用廄肥而排放約爲 1.49 百萬噸，再加上豆科固氮所生成之 0.5 百萬噸，則全世界每年由農耕地排放之 N_2O-N 總量約爲 3.5 百萬噸(範圍爲 1.8 至 5.3 百萬噸)(趙，1997)。足見等量存於堆、廄肥中之氮素，轉成爲 N_2O 之比例尙高於化肥。從田間長期試驗與實驗室孵育試驗亦顯示，由於施用堆肥處理的土壤水分含量較化肥區高，脫氮作用亦較強，因此釋出之 N_2O 亦較高。

土壤釋出甲烷與氧化亞氮的多寡，受土壤、氣候、植生、田間管理等因子之影響(Eichner, 1990；Mosier, 1994；Sass et al., 1994；Trolldenier, 1995)。影響因子相當複雜。目前有許多研究人員從事於農業栽培管理技術之研究，欲使農業生態系中所生成之甲烷與氧化亞氮之總量下降，而達減量之目標。其中以提高肥效的減量效果最佳。

3)農地鹽分的累積：

無論化學肥料或有機肥料的施用都有可能造成農田鹽分的累積。特別是直接施用禽畜糞或以禽畜糞製成堆肥施用者，因爲一般在飼養禽畜時，爲了促進它們的生長速度及增強它們的抵抗力，往往在飼料中會添加一些無機鹽類，使得禽畜糞的可溶性鹽類較高，故大量施用禽畜糞時，會使得土壤累積過多的可溶性鹽類，而導致土壤導電度(EC 値)增高，如此不但不利於作物根系對水分和養分的吸收，且會逐漸破壞土壤物理性而降低土壤的品質。

特別是在施肥量較大的蔬菜專業區，西螺蔬菜專業區之施肥量，一年三要素每公頃用量幾近十噸，換算成肥料，則用量更爲驚人，因而導致土壤累積多量的肥料鹽分，使植體吸收累積多量硝酸態氮，同時淋洗污染地下水源(吳，1997)。另外，設施栽培土因沒有天然雨水的淋洗，鹽分容易累積於表土，根據(陳，1995b)設施栽培土壤鹽化之調查，顯示設施栽培，土壤鹽化程度較一般栽培爲烈，同時隨栽培時間之增加而加深鹽化現象。

4)農地重金屬的累積：

根據分析，台灣禽畜堆肥以銅、鋅、鉻、鎳含量較高。這些高含量之銅、鋅、鉻、鎳之來源主要爲飼料中銅、鋅之添加，以及在堆肥製作過程中皮革粉之添加(添加鉻酸、鎳酸來搓揉皮革，其鉻、鎳含量分別佔皮革粉中之 5.4%與 0.03%)之故。依黃與戴(1995)所述旗山試區有機農耕法玉米總穗收穫量爲 10.6 公噸，換算銅移走量爲 37 克，而鋅移走量爲 107 克，此量僅爲施入量之 3%，故造成土壤中 0.1N 鹽酸萃取銅、鋅量逐年增加。此外，根據許多的實驗室與田間試驗指出，大部份之重金屬要污染地下水是不可能的，除非在很砂質地的土壤及淺層的地下水條件下。因此，堆肥中重金屬在農田表土的累積問題要注意。將於後節中介紹由堆肥中所含重金屬及農田可承受的最大承載量估算每年合理的施用量。

5)環境衛生與空氣品質

禽畜糞常含蟲卵，病原菌並會產生臭味，直接施用於農地後易危害作物的生長及污染周遭環境和衛生。最好能經過堆置醱酵殺菌後，再施用於田間。堆肥堆置的地點應考慮與住家及水源之距離，並配合風向，以防堆置過程逸出之氣味影響空氣品質。堆肥或有機肥料必需有較大的儲存設備，以應季節需要並避免逕流淋洗對環境之衝擊。

四、防範重金屬污染之有機肥最大承載量評估

爲防範重金屬污染農地所估算之有機肥最大承載量評估，可依陳(1995a)之估算方法。假設土壤中重金屬之最大可承載濃度(Maximum Loading Concentration, MLC)之估算爲土壤中重金屬之管制值與背景值間之差，可用下式表示：

最大可承載濃度＝管制值濃度－背景值濃度---------------------(1)

土壤重金屬含量之背景值通常是一個含量範圍值，爲計算方便起見，現以背景值之平均值爲基準來估算最大可承載濃度，其結果如表 1 所示。如依王銀波等人(1994a)，其最大可承載濃度分別爲 As11.1 mg/kg，

Cd1.2 mg/kg，Cr157 mg/kg，Cu128 mg/kg，Hg0.8 mg/kg，Ni78 mg/kg，Pb60mg/kg 與 Zn110 mg/kg。依此結果，可計算在 1 公頃範圍內表土 20 公分土壤中(假設容積比重為 1.2 Mg/m^3)，可添加之最大承載重量(Maximum Loading Capacity, MLC, kg/ha)應為 As26.6 kg/ha，Cd2.9 kg/ha，Cr377 kg/ha，Cu307 kg/ha ，Hg1.9 kg/ha，Ni187 kg/ha，Pb144 kg/ha 與 Zn264 kg/ha。

依據表 1 中之最大可承載量(MLC)之推估，再依據堆肥中重金屬之濃度，即可很容易計算出最大堆肥施用量，其計算式如下：

$$\text{最大堆肥施用量（tons/ha）} = \frac{\text{最大可承載估算量(kg/ha)}}{\text{堆肥中重金屬濃度(mg/kg)}} \times 10^3 \quad \text{--------(2)}$$

例如在表 1 中，土壤中最大可承載銅量為 307kg/ha，而堆肥中重金屬銅濃度允許上限為 300mg/kg，依上式公式，我們可添加之最大堆肥重量為 1000 噸/公頃左右。因此，在確保土壤中重金屬不會超過污染管制值之情況，我們依堆肥中重金屬可能濃度狀況下，估算其最大施肥量如表 2 所示。但在肥料規定中重金屬含量上限條件下，估算豬糞堆肥之最大施用量為 Cu3000 噸/公頃，Zn500 噸/公頃，Cr2330 噸/公頃與 Ni7200 噸/公頃。因此，綜合來說，在此上限濃度下之最大施用量最好控制在 500 噸/公頃以下。

為考慮對土壤、作物及環境之品質，建議合理施用量應為估算最大施用量之一半較為安全，最好不要超過 250 噸/公頃。但如將生產堆肥之過程中，其重金屬濃度控制在銅 100mg/kg 及鋅 200mg/kg 以下，則最大施用量可達 1250 噸/公頃，而建議合理施用量為 600 噸/公頃左右，可確實增加土壤中之有機質含量且可確保土壤品質，不會受到重金屬污染。

以上之估算，乃以有機肥料中重金屬含量上限，概估其最大施用量，亦可以有機肥料中實測之重金屬濃度計算，若每年累用的堆肥量已超過最大容許量，即應停止施用，並在施用安全期限內，採土樣檢測，

以了解重金屬累積情形，再計算可施用之最大量，以確保土壤品質。並詳實記錄每年的施用量，以避免施用總量超過安全施用量。

五、有機質肥料特性與地力增進效果

可用於肥田的有機資材種類甚多，但就有機質的主要功能來劃分，一般可分為易分解型與難分解型，前者以供應養分為目的，養分含量高，且釋放速度亦快，目前國內較常用的易分解型有機質肥料為油粕類、綠肥、禽畜糞等，難分解型有機資材，則含有較多的木質素與穩定腐植質，在土壤中的分解速度較慢，雖也提供部分養分，但仍以改善土壤物理化學性質，促進土壤微生物活性，使作物根部有良好生長環境為目的。國內常見的難分解型有機質肥料，多是以作物殘體及農產廢棄物堆製腐熟的堆肥，由於在腐熟過程中，易分解物質已被微生物利用，故堆積後，難分解之木質素與腐植質成分比例增加，可在土壤中維持較長的時間。泥炭的分解速度更慢，屬於土壤改良劑資材。

由台北水田長期試驗顯示，化肥區較無肥區有更多的土壤有機質累積綠肥之施用對地力之增進不大，僅較化肥區維持稍高的土壤有機質含量(張等，1947；林等，1973)。長期施用堆肥對有機質之累積雖不及溫帶國明顯，但仍可增加土壤有機質的含量。在每年 2.8 公噸/公頃碳量(18 公噸/公頃 鮮重)的施用下，連續施用 48 年，土壤有機質只增加 1%，只有總施用量的 5%留於土壤中，顯示在台灣高溫潮溼的環境下，土壤有機質不易維持在高的含量，旱田的有機質分解更快，故欲藉有機質肥料的施用，提高地力，亦屬不易。在目前有機質肥料昂貴的情形下，其經濟效益低。但有學者認為能增加 1%有機質對土壤肥力的提升或土壤性質的改善已有很大的助益。

長期連續施用綠肥，對土壤有機質含量的提高非常有限，其功效在於對當期作養分的循環利用與土質改善，在北部水田中施用與化學肥料等量氮素之青皮豆，在連用 48 年，土壤有機質僅較化肥區多 0.2%之有機質。在屏東水稻與大豆輪作田將地上部作物殘體連續 14 年混入土壤中，亦僅增加 0.1%之有機質。

對於易分解資材在當期作養分的供應量較容易估算。連年施用有機質堆肥，則除了當作所施有機肥料可礦化之養分量外，亦要評估土壤中累積之既有有機質之礦化量。堆肥在施用初期因礦化率較低，肥料率概低於施肥量相當的化學肥料，連年施用後，因其分解殘餘之有機質逐漸累積，礦化率漸增，肥效率才漸接近於施肥量相當的化學氮肥，此累積之礦化率，理論上，不超過 100%，故其肥效在本質上並不超過施肥量相當之化學肥料。此可由投入等量氮量之長期試驗中，堆肥區在初期之產量不及化肥區，數年後可趕上化肥區者，而得到証實。在溫帶國家由於溫度低，堆肥的礦化率亦低，可建構豐富的有機養分貯存庫，但另一面必須持續更長的時間堆肥的累積肥料率才與化肥區者相同。

我國的氣候條件，既有利於有機物養分的循環利用，但欲以施用有機質肥料，提高土壤有機質含量以提昇地力，在施用大量有機質肥料過程中，需注意有機質肥料分解，釋出過量氮素，導致作物品質降低且造成環境二次污染。因此需按有機質肥料的分解特性，估計合理的施用量。

六、土壤與植體營養診斷之應用

作物對養分之需求，因氣候與土壤特性、管理條件而異，因此合理的施肥量推算，需考慮許多因素。目前農試所的土壤資訊系統已提供上網查詢之服務，可提供各地區農田土壤資源分佈、土壤肥力動態、土壤生產力等資訊，供地方土壤肥培管理之參考；與農林廳、各改良場亦共同編製作物施肥手冊，包括水稻、蔬菜和果樹等一百多種作物之施肥方法，可提供農民施肥之參考。另外，在農委會與農林廳的經費補助下，農試所與各區改良場都有土壤與植體營養診斷分析服務(陳與連，1989)，農民可自行採樣或請農會服務人員指導採取適當的土壤與葉片樣品，寄至分析中心，以得到診斷及施肥推薦書，再配合現場的複查，施用肥料，可增加作物對所施肥的利用率，並避免肥料的浪費或對環境造成污染。

七、結語

本省農產廢棄物甚豐，而大部分農產廢棄物都含有大量的有機物及多種植物所需的營養要素，若能有效的管理及正確的施用於農地，除了可達到資源回收再利用的目的外，亦可增進土壤的地力，促進作物的生長，並可減輕對環境及自然生態的衝擊。唯過量或不正確的施用，仍會對土壤、環境、人畜健康及作物生長造成傷害。施用有機質肥料應注意下列事項：

1)由於台灣環境高溫多溼，不利於土壤有機質的累積，無論施用有機質肥料，是以養分供給或是增進肥力為目的，都需要按著有機質的分解速度，估算合理的施用量，以避免過量氮素釋出，導致作物品質降低又造成環境二次污染。

2)為防止有機質肥料，隨逕流流失及污染地下水，應避免利用休閒地及在暴雨季節施用肥料或處理有機廢棄物。對於透水性高之砂質土壤或砂礫地尤應注意施肥量及施肥方法，避免污染地下水。堆肥或有機肥料必需有較大之儲存設備，以應季節需要並避免淋洗逕流對環境之衝擊。

3)為避免因施用禽畜糞堆肥而造成農田土壤之重金屬污染，除建議由飼料添加物管制外，另亦依農業土壤中重金屬含量之背景值和環境之污染管制值，提出豬糞堆肥之最大可施用量參考值 500 公噸/公頃，安全施用量約為 250 公噸/公頃以內。建議詳實記錄每年的施用量，以避免施用總量超過安全施用量。

4)為保持環境衛生及空氣品質，堆肥堆置地點應盡量遠離住家與水源，並注意風向，以防堆置過程逸出之氣味影響空氣品質。施用於農田，亦盡可能覆土，以防引來蒼蠅，影響環境衛生。

八、參考文獻

1.王銀波、陳尊賢、劉文徹、吳先琪、趙震慶、李國欽、王榮德。1994a。土壤品質基準－總論。行政院環保署委託計畫報告(EPA-83-E3H1-09-02)。台北市。

2.王銀波、譚鎭中、黃紋賓。1994b。肥料施用與土壤水中銨與硝酸根之分佈I、蔬菜園與水稻田之比較、土壤與肥料污染研討會論文集。pp.131-143。

3.吳正宗。1997。飲水與蔬菜中硝酸鹽的來源與減量對策。土壤肥料通訊。第 61 期。pp.13-16。

4.林家棻、李子純、張愛華、陳卿英。1973。長期連用同樣肥料對於土壤化學性質與稻谷收量之影響。農業研究 22(4)：241-262。

5.林木連、郭鴻裕、朱戩良、劉禎祺、彭宗仁。1999。屏東平原地下水水質變化研究。第三屆地下水資源及水質保護研討會論文集。元/13,14。中央大學。中壢。

6.張守敬、林家棻、步焱昇。1947。同種肥料連用對於水稻產量及土壤理化性之影響。台灣農業試驗所彙報。第 3 號：18-41。

7.郭鴻裕、朱戩良、江志峰。1998。農田土壤肥力劣化問題之檢討。台灣省農業試驗所 86 年年報。

8.陳琦玲、連深。1989。果園土壤及葉片營養診斷資訊系統之初擬，果園作物營養診斷應用研習會專輯。台灣省農業試驗所特刊第 28 號。p.85-115。

9.陳尊賢。1995a。長期施用豬糞堆肥對土壤中重金屬之累積及合理施用量之評估。有機質肥料合理施用技術研討會論文集。pp.200-214。

10.陳鴻堂。1995b。設施土壤肥料問題解決對策。設施與集水區土壤肥料講習專刊。中華土壤肥料學會編印。P.18-38。

11.黃賢喜、戴順發。1995。有機農業可行性之研究。八十三年度土壤肥料試驗報告。農林廳編印。

12.趙震慶。1997。氧化亞氮與氮肥。土壤肥料通訊。第 61 期。pp.17-20。

13.劉玉雪、徐玉標。1994。台灣省嚴重污染灌區之土壤、作物與地下水之惡化調查(高雄二仁溪灌區)，83 年農業工程研討會論文集。pp.217-229。

14.Bartlett, K. and R.C. Harriss. 1993. Review and assessment of methane emission from wetlands. Chemosphere. 26:261-320.

15.Battle, M., M. Bender, T. Sowers, P.P. Tans, J.H. Buter, J.W. Elkins, T. Conway, N. Zhang, P. Lang, and A.D. Clarke. 1996. Atmospheric gas concentrations over the past century measured in air from firn at the South Pole. Nature 383:231-235.

16.Campell, J.B., A.N. Davis, and P.J. Myhr. 1954. Methemoglobinemia of livestocks caused by high nitrate content of well water. Can. J. Camp. Med. 18:93-101

17.Cole, V., C. Cerri, K. Minami, A. Mosier, N. Rosenberg, and D. Sanerback. 1995. Agricultural options for mitigation of greenhouse gas emission. pp.745-771. In R.A. Houghton et al (eds.) Climate change. Cambridge Univ. Press, Cambridge, U.K. 17. Dendooven, L., E. Bonhomme, R. Merckx, and K. Vlassak. 1998. N dynamics and sources of N_2O production following pig slurry application to a loamy soil. Biol. Fertil. Soils 26:224-228.

18.Ehhalt, D.H. and U. Schmidt. 1978. Sources and sinks of atmospheric methane. PAGEOPH. 116:452-464.

19.Eichner, M.J. 1990. Nitrous oxide emission from fertilized soil: Summary of available data. J. Environ. Qual. 19:272-280.

20.Kimura, M., H. Murakami, and H. Wada. 1991. CO_2, H_2 and CH_4 production in rice rhizosphere. Soil Sci. Plant Nutr. 37:55-60.

21.Lal, R. and B.A. Stewart. 1994. Soil processes and water quality. Lewis Publishers. Ann Arber, Mi. USA. p.5.

22.Mosier, A.R. 1994. Nitrous oxide emission from agicultural soils. Fert. Res. 37:191-120.

23.Mosier, A.R., J.M. Duxbury, J.R. Freney, O. Heinemeyer, and K. Minami. 1996. Nitrous oxide emission from agricultural fields: Assessment, measurement and mitigation. Plant and Soil 181:95-108.

24.OECD (Organization for Economic Co-operation and Development). 1986. Water Pollution by Fertilizers and Pesticides. OECD Publications. Paris.

25.Prinn, R.D., R. Connold, R. Rasmussen, P. Simmonds, F. Alyea, A. Crawford, P. Fraser, and R. Rosen. 1990. Atmospheric emissions and trends of nitrous oxide deduced from 10 years of ALE-GAGE data. J. Geophys. Res. 95:18369-18385.

26.Sass, R.L., F.M. Fisher, S.T. Lewis, M.F. Jund, and F.T. Turner. 1994. Methane emissions from rice fields: effect of soil properties. Global Biogeochem. Cycle 8:135-140.

27.Trolldenier, G. 1995. Methanogenesis during rice growth as related to the water regime between crop seasons. Biol. Fertil. Soils. 19:84-86.

28.Vitousek, P.M., and P.A. Matson. 1993. Agriculture, the global nitrogen cycle and trace gas flux. pp.193-208. In. R.S. Oremland (ed), Biogeochemistry of global change, Champman and Hall. New York.

29.Wang, W.C., Y.L. Yung, A.A. Lacis, T. Mo, and J.E. Hansen. 1976. Green house effects due to man-made pertubations of trace gases. Science. 194:685-690.

表 1、農田土壤表土 20 公分重金屬最大承載量之評估

重金屬	背景值[a]	管制值[b]	最大可承載濃度[c]	表土 20 公分最大可承載量[d]
	-------------	mg/kg	-------------	---------kg/ha-------
As	8.9	20	11.1	26.6
Cd	1.8	3	1.2	2.9
Cr	43	200	157	377
Cu	22	150	128	307
Hg	0.2	1.0	0.8	1.9
Ni	42	120	78	187
Pb	40	100	60	144
Zn	190	300	110	264

a：Chen and Lee(1995)　　b：王銀波等人(1994a)
c：最大可承載濃度＝管制值－背景值
d：表土 20 公分最大可承載量 (kg/ha)
　$=$最大可承載濃度$(mg/kg)\times(100m)^2\times0.2m\times1.2Mg/m^3\times10^3/10^6$
　$=$最大可承載濃度 $(mg/kg)\times2.4$
(資料來源：陳，1995)

表 2、農田土壤中合理堆肥施用總量推估

重金屬	重金屬濃度	最大承載量估值[a]	合理施用量[c]
	----mg/kg--	-----------tons/ha	----------
Cu	100[b]	3000	1500
	200	1500	750
	300	1000	500
Zn	100	2500	1250
	200	1250	625
	500[b]	500	250
Cr	100	3500	1750
	150[b]	2330	1160
	300	1160	580
Ni	25[b]	7200	3600
	50	3600	1800
	150	1200	600

a：肥料重金屬含量規格上限爲 Cu100mg/kg，Zn500mg/kg，Cr150mg/kg 與 Ni25mg/kg。
b：依表 8 計算出之最大承載量(Cu300kg/ha，Zn250kg/ha，Cr350kg/ha 與 Ni180kg/ha)來估算施肥量，並施用於表土 20cm 內。
c：建議合理施用量爲最大施用量之一半，以確保土壤品質。
(資料來源：陳，1995)